



ЗДРАВСТВУЙТЕ!

Тема: Фотоэлектрический эффект

- 19.1. Фотоэлектрический эффект;**
- 19.2. Законы внешнего фотоэффекта;**
- 19.3. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта;**
- 19.4. Применение фотоэффекта (самостоятельно!!!)**
- 19.5. Масса и импульс фотона;**
- 19.6. Эффект Комптона и его элементарная теория;**

Сегодня: *

Лекция 19

Тема: Фотоэлектрический эффект

Продолжение

**19.7. Корпускулярно-волновой дуализм;
электромагнитного излучения**

19.8. Волны де Бройля. Опыт Девиссона.

19.1. Фотоэлектрический эффект

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения абсолютно черного тела, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта — явления, открытие и исследование которого сыграло важную роль в становлении квантовой теории. Различают фотоэффект внешний, внутренний и вентильный. **Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.** Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация). Фотоэффект открыт в 1887 г. Г. Герцем, наблюдавшим усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовыми лучами.

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым А. Г. Столетовым. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта

обкладкой которого была медная сетка C , а отрицательной — цинковая пластина D . Когда от источника света S лучи направлялись на **отрицательно** заряженную пластину D , в цепи возникал электрический ток. Когда пластина D заряжалась **положительно**, а сетка C **отрицательно**, гальванометр G не обнаруживал электрического тока.

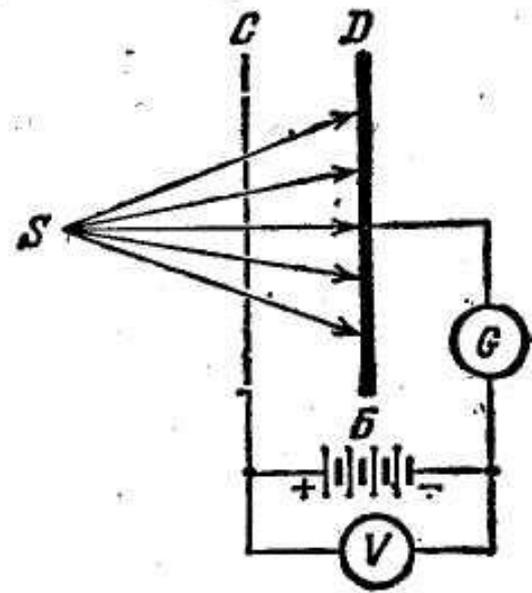


Рис.19.1

Столетов установил следующие закономерности, не утратившие своего значения до нашего времени:

- 1) **наиболее эффективное действие оказывают ультрафиолетовые лучи;**
- 2) **под действием света вещество теряет только отрицательные заряды;**
- 3) **сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.**

В 1899 г. Ф. Ленард (1862 - 1947, немецкий физик) и У. Томсон методом отклонения зарядов в электрическом и магнитном полях определили удельный заряд частиц, вырываемых светом из катода, доказав, что эти частицы являются электронами. Это было подтверждено в 1922 г. опытами А. Ф. Иоффе и Н. И. Добронравова, исследовавшими фотоэффект на микроскопических заряженных металлических пылинках.

Кроме внешнего фотоэффекта существует **внутренний фотоэффект** - вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета **наружу**. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к

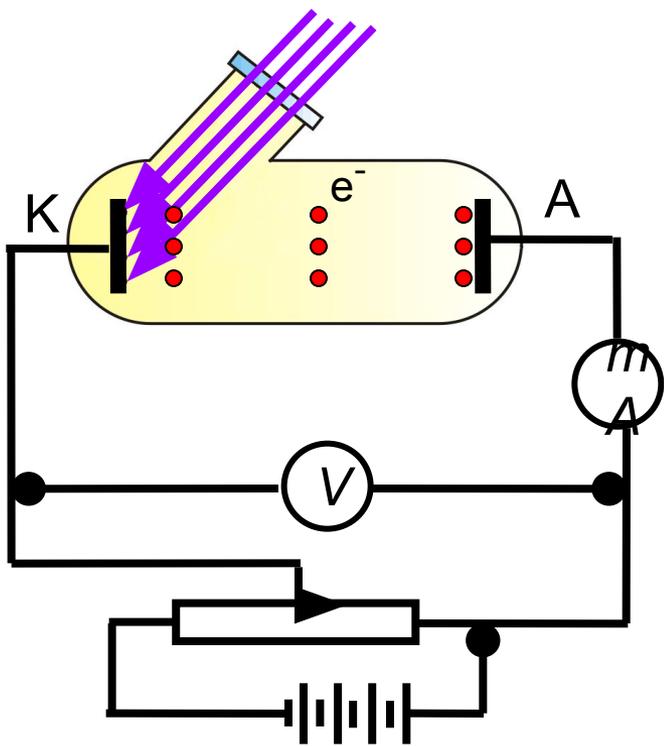


Рис.19.2

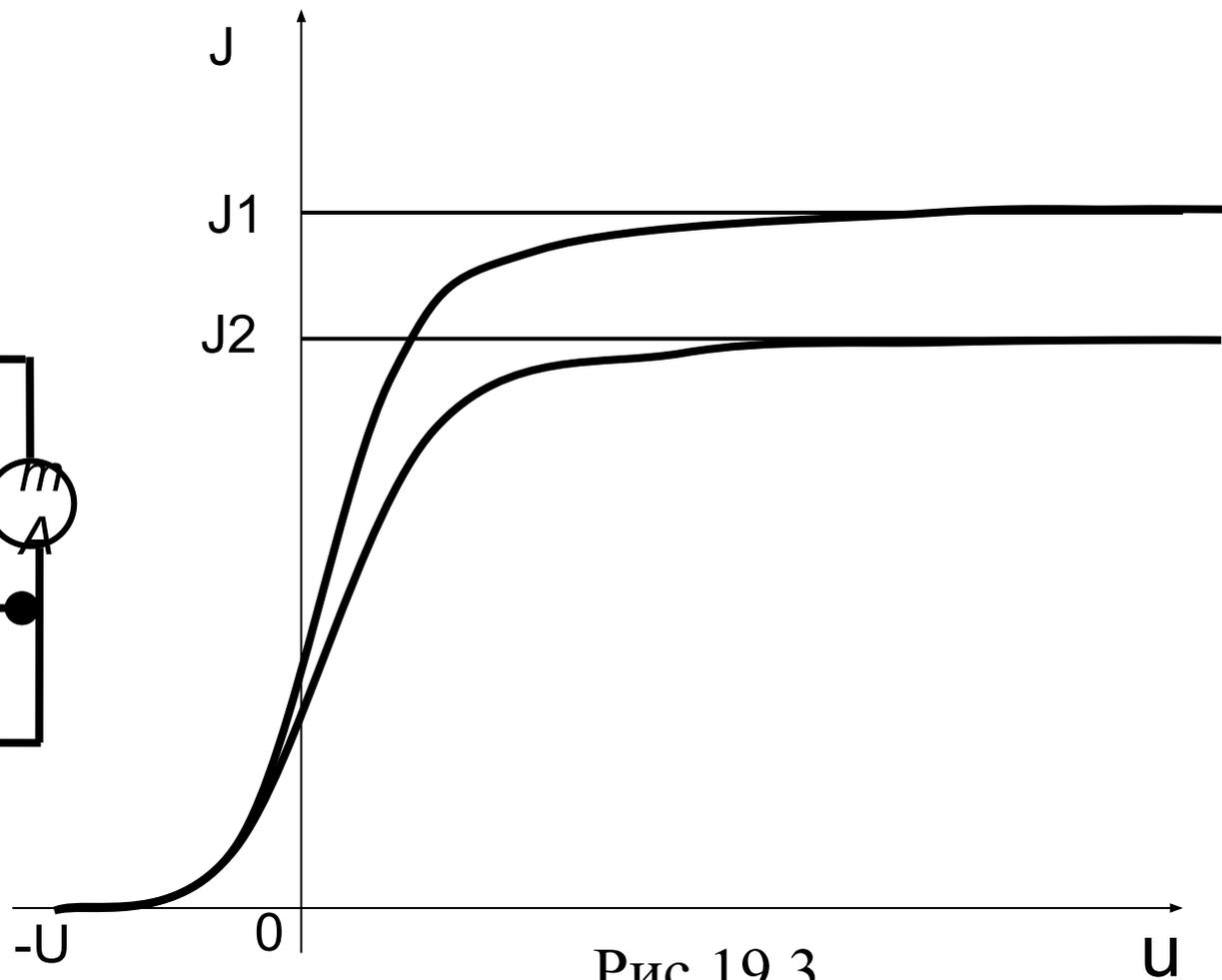


Рис.19.3

Вентильный фотоэффект — возникновение э. д. с. (фото-э. д. с.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект открывает, таким образом, пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Приведенная на рис. 19.2 экспериментальная установка позволяет исследовать вольтамперную характеристику фотоэффекта — зависимость фототока J , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения U между электродами. Такая зависимость, соответствующая двум различным освещенностям E_0 катода (частота света в обоих случаях одинакова), приведена на рис. 19.3. По мере увеличения U фото-ток постепенно возрастает, т. е. все большее число фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривых показывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями.

Максимальное значение тока $J_{\text{нас}}$ — *фототок насыщения* — определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода: $J_{\text{нас}} = en$,

где n — число электронов, испускаемых катодом в 1 с. Из вольтамперной характеристики следует, что при ($U = 0$) фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью u , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** U_0 . При $U = U_0$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью $u_{\text{макс}}$, не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$mv^2 / 2 = eU_0, \quad (19.1.1)$$

т. е., измерив задерживающее напряжение U_0 , можно определить максимальные значения скорости и кинетической энергии фотоэлектронов.

Путем изучения вольтамперных характеристик разнообразных материалов (важна чистота поверхности, поэтому измерения проводятся в вакууме и на свежих поверхностях) при различных частотах падающего на катод излучения и различных энергетических освещенностях катода и обобщения полученных данных были установлены следующие три закона внешнего фотоэффекта (Законы Столетова).

19.2. Законы внешнего фотоэффекта

I. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности E_e катода).

II. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν , а именно линейно возрастает с увеличением частоты.

III. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

Кроме того, установлена *практическая безинерционность* фотоэффекта: ток немедленно возникает при освещении поверхности тела, при условии, что частота света $\nu \gg \nu_0$.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не должно было бы представлять трудностей. Действительно, под действием поля световой волны в металле возникают вынужденные колебания электронов, амплитуда которых (например, при резонансе) может быть достаточной для того, чтобы электроны покинули металл; тогда и наблюдается фотоэффект. Кинетическая энергия, с которой электрон вырывается из металла, должна бы зависеть от интенсивности падающего света, так как с увеличением последней электрону передавалась бы большая энергия. Однако этот вывод противоречит II закону фотоэффекта. Так как, по волновой теории, энергия, передаваемая

электронам, пропорциональна интенсивности света, то свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности должен бы вырывать электроны из металла; иначе

закону фотоэффекта. Кроме того, волновая теория не смогла объяснить безинерционность фотоэффекта, установленную опытами. Таким образом, фотоэффект необъясним с точки зрения волновой теории света.

19.3. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им *квантовой теории фотоэффекта*. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только *испускается*, как это предполагал Планк, но и *распространяется* в пространстве, и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\epsilon_0 = h\nu$.

В монохроматическом свете с частотой ν все фотоны имеют одинаковую энергию, равную $h\nu$. Поглощение света состоит в том, что фотоны передают *всю свою энергию!!!* атомам и молекулам вещества. Из этого следует, что

распространение, происходит *прерывно*, отдельными порциями.

Эйнштейн пришел к этим результатам, анализируя свойства электромагнитного поля излучения с частотой ν , заключенного в объеме V_0 . стенки которого абсолютно «черные». Он доказал, что возможно такое состояние электромагнитного поля, когда вся его энергия E соберется в малом объеме $V \ll V_0$. Вероятность такого явления, как показал Эйнштейн, выражается формулой $w = (V/V_0)^{E/h\nu}$. Этот результат он сравнил с полученным им же результатом по расчету вероятности флуктуации плотности газа. Пусть в объеме V_0 находится N молекул идеального газа. Существует определенная, хотя и очень малая, вероятность того, что все молекулы самопроизвольно соберутся в объеме $V \ll V_0$. Легко убедиться, что $w = (V/V_0)^N$. Сравнивая эти формулы для вероятностей рассматриваемых флуктуации, Эйнштейн пришел к выводу, что в случае электромагнитного поля роль числа частиц играет отношение $E/h\nu$. Это означает, что излучение состоит из отдельных частиц — фотонов.

Т.о, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c распространения света в вакууме. Эти кванты электромагнитного излучения получили название фотонов. По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т. е. пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта). Безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $m_0 v_{\text{макс}}^2 / 2$.

По закону сохранения энергии,

$$mv_{\text{макс}}^2/2. \quad hv = A +$$

(19.3.1)

Уравнение (19.3.1) называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна позволяет объяснить II и III законы фотоэффекта. Из (19.3.1) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов), так как ни A , ни v от интенсивности света не зависят (II закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A = \text{const}$), то при некоторой достаточно малой частоте $v = v_0$ кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (III закон фотоэффекта). Согласно

и есть «красная граница» фотоэффекта для данного металла. Она зависит лишь от работы выхода электрона, т. е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Выражение (19.3.1), используя (19.1.1) и (19.3.2), можно записать в виде

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0). \quad (19.3.3)$$

Подтверждением правильности формулы (19.3.3) является определение из нее постоянной Планка:

Из опыта необходимо определить величину напряжения ($-U_0$), при котором исчезает фототок. Далее, необходимо построить графически зависимость eU_0 от ν . Эта зависимость выражается прямыми, представленными на рис. 19.4 для трех металлов: алюминия, цинка и никеля. Точками изображены результаты измерений eU_0 при различных частотах. Видно, что все прямые параллельны друг другу, причем наклон прямых не зависит от природы металла. По углу между прямыми и осью абсцисс можно определить постоянную Планка: $\operatorname{tg} \alpha = hK$,

размерных величин, принятых за единицы масштаба по осям eU_0 и ν . В наиболее точных опытах, проведенных в 1928г. П. И. Лукирским и С. С. Прилежаевым, вакуумная трубка, изображенная на рис. 19.5, представляла собой сферический конденсатор. Стеклянный шар, посеребренный изнутри, являлся внешней обкладкой конденсатора и играл роль анода A . Катод K имел вид шарика из исследуемого металла. В этой установке на анод попадают все электроны с такой начальной скоростью u_0 , так что $mu_0^2 \geq e|U_0|$, где U_0 — задерживающее напряжение. Это повышает точность определения максимальной скорости фотоэлектронов u_0 и позволяет

постоянную Планка

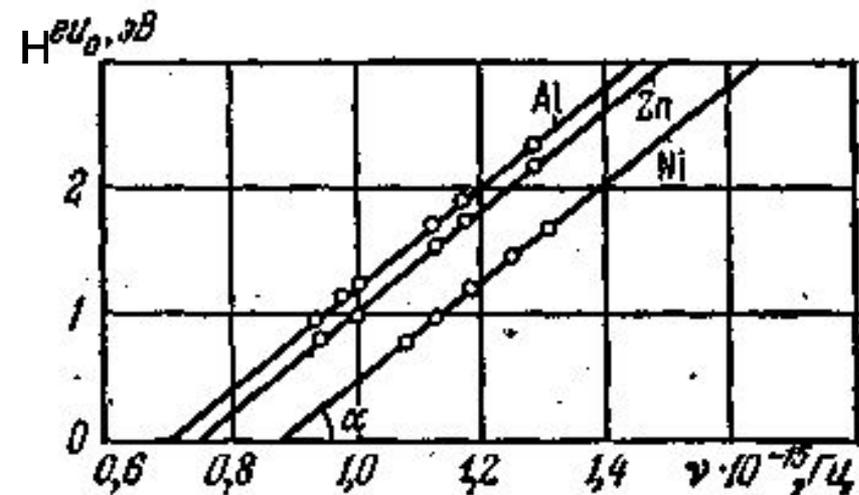


Рис.19.4



Рис.19.5

Среднее значение h , полученное из наиболее точных опытов по внешнему фотоэффекту, оказалось равным $6,543 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Это согласуется с результатами других методов определения h . Тем самым подтверждается правильность уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и идей Эйнштейна о квантовом характере взаимодействия света с электронами при фотоэффекте.

Если интенсивность света очень большая (лазерные пучки), то возможен многофотонный (нелинейный) фотоэффект, при котором электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не одного, а N фотонов ($N = 2, 3, 4, 5$). Многофотонный фотоэффект описывается уравнением

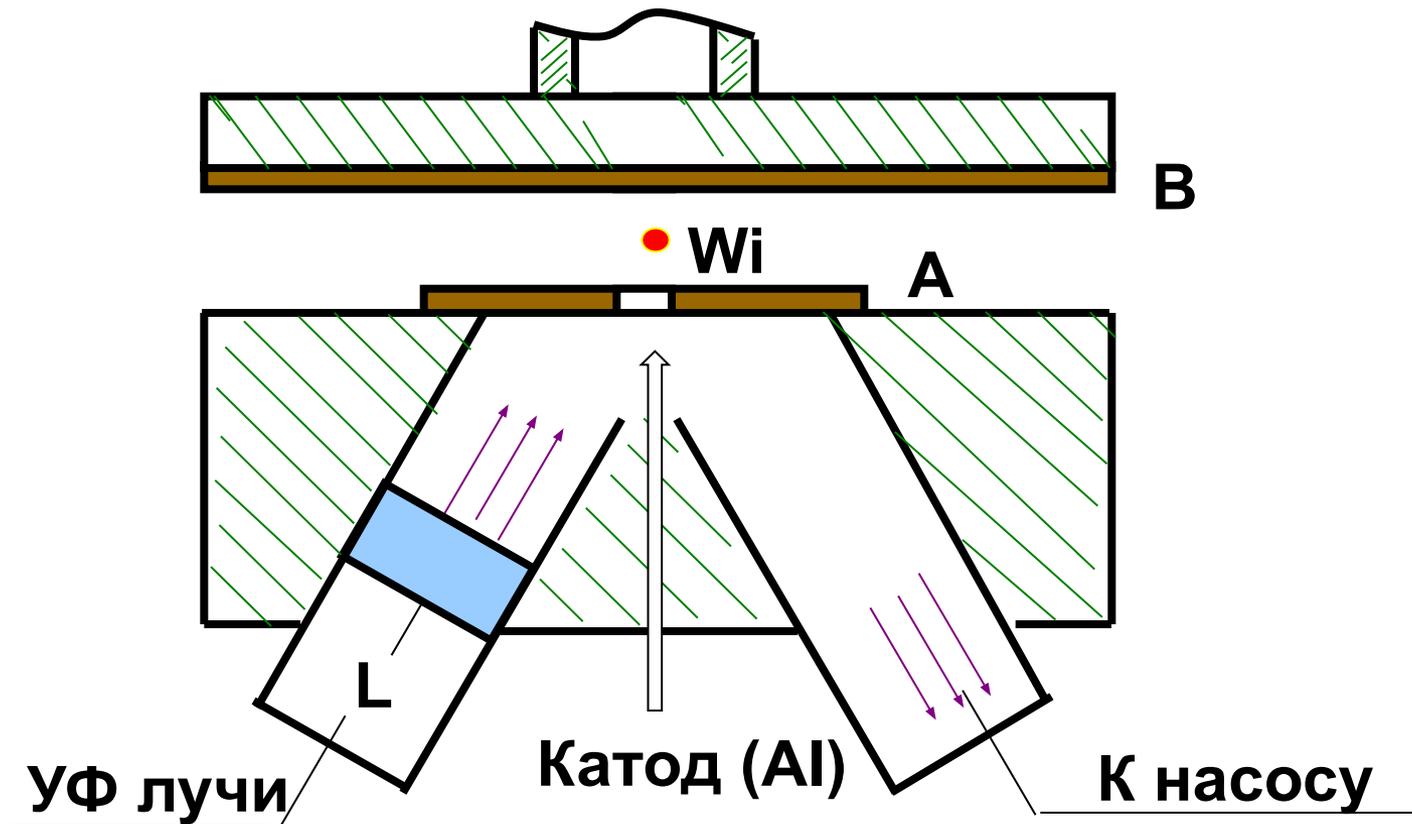
$$N h \nu = A + m u^2 / 2.$$

Соответственно «красная граница» многофотонного фотоэффекта

$$(\nu_0)_N = A / (N h)$$

Блестящим экспериментальным подтверждением идеи Эйнштейна о распространении света в виде потока отдельных фотонов и квантовом характере взаимодействия электромагнитного излучения с веществом явились опыты А. Ф. Иоффе и Н. И. Добронравова по изучению фотоэффекта на микроскопических пылинках из висмута. Пылинка уравнивалась в электрическом поле плоского конденсатора. Одна из пластин конденсатора изготовлялась из тончайшей алюминиевой фольги, которая являлась одновременно антикатодом миниатюрной рентгеновской трубки. Антикатоде бомбардировался ускоренными до 12 кВ фотоэлектронами, испускаемыми катодом при освещении ультрафиолетовым светом. Освещенность катода подбиралась такой слабой, чтобы из него в 1 с вырывалось лишь 1000 фотоэлектронов. Это же означает, что рентгеновское излучение антикатада состояло из отдельных импульсов (1000 импульсов в 1 с). Из опыта следовало, что в среднем через каждые 30 мин уравновешенная пылинка выходила из равновесия т. е. рентгеновское излучение

3. Опыт А.Ф.Иоффе и Н.И.Добронравова



Wi – Висмутовая пылинка $r = 3 \cdot 10^{-5}$ см

L – Кварцевое окошко

A – Анод из Al, толщиной $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мм

B – Пластика

Если бы рентгеновское излучение распространялось в виде сферических волн, а не отдельных фотонов, то каждый рентгеновский импульс отдавал бы пылинке очень малую часть своей энергии, которая распределялась бы, в свою очередь, между

огромным числом электронов, содержащихся в пылинке. Поэтому при таком механизме трудно вообразить, что один из электронов за такое короткое время, как 30 мин, может накопить энергию, достаточную для преодоления работы выхода из пылинки. Напротив, с точки зрения корпускулярной теории это возможно. Так, если рентгеновское излучение распространяется в виде потока дискретных фотонов, то электрон выбивается из пылинки только тогда, когда в нее попадает фотон. Элементарный расчет для выбранных условий дает, что в среднем в пылинку попадает один фотон из 1800000. Так как в 1 с вылетает 1000 фотонов, то в среднем в пылинку будет попадать один фотон в 30 мин, что согласуется с результатами опыта. Если свет представляет собой поток фотонов, то каждый фотон, попадающий в

независимо от других фотонов. Это же означает, что при регистрации слабых световых потоков должны наблюдаться флуктуации их интенсивности. Эти флуктуации слабых потоков видимого света действительно наблюдались С. И. Вавиловым. Наблюдения проводились визуально. Глаз, адаптированный к темноте, обладает довольно резким порогом зрительного ощущения, т. е. воспринимает свет, интенсивность которого не меньше некоторого порога. Для света с $\lambda = 525$ нм порог зрительного ощущения соответствует у разных людей примерно 100 — 400 фотонам, падающим на сетчатку за 1 с. С. И. Вавилов наблюдал периодически повторяющиеся вспышки света одинаковой длительности. С уменьшением светового потока некоторые вспышки уже не воспринимались глазом, причем чем слабее становился световой поток, тем больше было пропусков вспышек. Это объясняется флуктуациями интенсивности света, т. е. число фотонов оказывалось по случайным причинам меньше порогового значения. Таким образом, опыт Вавилова явился наглядным подтверждением квантовых свойств света

